

0 7 2 4 8 8 8 -1

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Гриб Сергей Анатольевич

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МГД РАЗРЫВОВ
В СОЛНЕЧНОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2001

Работа выполнена в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской Академии Наук.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор Ю.З.Алешков

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



доктор физико-математических наук
профессор И.С.Веселовский
доктор физико-математических наук
профессор Г.Б.Гельфрейх

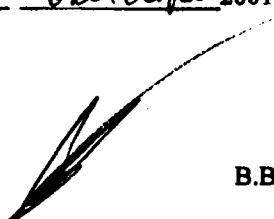
Ведущая организация: Физический институт РАН им. П.Н.Лебедева

Защита состоится 27 декабря 2001 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета (Д22.232.15) по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, г.Санкт-Петербург, Петродворец, Библиотечная пл., д.2, ауд.2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета.

Автореферат разослан "31" октября 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат.наук



В.В.Орлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Большая часть вещества во Вселенной представляет собой плазму, пронизанную магнитным полем. Магнитное поле влияет как на статическое, так и на динамическое состояние плазмы в соответствии с законами магнитной гидродинамики, используемыми для объяснения явлений, происходящих во многих астрофизических объектах таких, как галактики, звезды и звездный ветер.

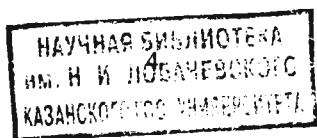
Известно, что в солнечной плазме, принадлежащей Солнцу, типичной звезде главной последовательности, и в плазме солнечного ветра, частном случае звездного ветра, обычно присутствуют сильные магнитогидродинамические (МГД) разрывы различного типа, принадлежащие разным плазменным структурам. МГД подход к изучению динамики солнечной короны и солнечного ветра, включающий рассмотрение МГД разрывов, ограничен приближением сплошной среды, но при этом именно он дает возможность точно определять значения основных параметров рассматриваемых областей, включающих плотность плазмы, скорость потока, давление и величину магнитного поля. Эти параметры хорошо описывают поведение плазмы в короне Солнца и в потоке солнечного ветра в рамках как стационарных (независящих от времени), так и нестационарных (зависящих от времени) представлений о движении потоков частиц. Известно, что МГД волны играют важную роль в динамике солнечной короны, перенося энергию, нагревая и ускоряя плазму. При этом магнитозвуковые волны часто носят нелинейный характер и в момент опрокидывания за счет градиентной катастрофы могут превращаться в МГД корональные ударные волны и ударные волны солнечного ветра. Существует более тысячи наблюдений нестационарных межпланетных ударных волн и разрывов направления, входящих в состав потока солнечного ветра. Обычно такие волны имеют прямую связь с солнечными вспышками или с часто наблюдаемыми на космических аппаратах корональными выбросами массы. Кроме того, имеется также большое количество данных по наблюдению стационарных разрывных структур типа солнечных тангенциальных разрывов, гелиосферного токового слоя, магнитопаузы, плазмопаузы Земли, ионопаузы Венеры, кометопазузы и гелиопаузы на границе гелиосферы. Также давно замечено, что причиной глобального возмущения магнитосферы Земли и внезапного начала геомагнитной бури (SSC) является приход нестационарной МГД ударной волны со стороны стационарного потока солнечного ветра. Кроме того, тангенциальные разрывы солнечного

происхождения, стационарные по отношению к потоку, также могут вызывать резкое изменение состояния магнитосферы и геомагнитный импульс типа SSC.

Континуальный МГД подход хорошо описывает распространение ударных волн и физическое поведение потока плазмы тогда, когда характерный размер задачи L достаточно велик по сравнению с протонным радиусом Лармора и для достаточно низких частот, меньших гирочастоты.

Впервые межпланетная ударная волна солнечного происхождения наблюдалась в 60-х годах на космическом аппарате Маринер-2 по плазменным и магнитным данным, причем ударная волна являлась быстрой МГД ударной волной, при переходе через фронт которой резко возрастали значения величин плотности заряженных частиц и интенсивности межпланетного магнитного поля. С тех пор накопилось много данных, свидетельствующих о наличии в солнечном ветре множества МГД разрывов типа ударных волн, вращательных и тангенциальных разрывов. Теперь из экспериментальных данных известно также, что ударные волны и тангенциальные разрывы солнечного ветра при подходе к магнитосфере Земли вызывают внезапное начало геомагнитной бури, наблюдаемое на различных обсерваториях по всей Земле. Солнечные ударные волны образуются самопроизвольно в результате нелинейных процессов, от вспышек на Солнце и в качестве головных волн сопровождают корональные выбросы массы и магнитные облака в стационарном потоке солнечного ветра. При этом наблюдаемые в солнечном ветре МГД ударные волны обычно являются быстрыми ударными волнами, на которых при переходе через ударный фронт возрастает величина межпланетного магнитного поля, и очень редко наблюдаются медленные ударные волны, уменьшающие его величину. О наблюдениях последних впервые сообщалось в работах 70-х годов. Кроме того, указывалось на возможность устойчивого существования межпланетных медленных ударных волн при малом значении плазменного параметра, равного отношению газокинетического давления к давлению магнитного поля, и малом значении отношения ионной температуры к электронной. Как быстрые, так и медленные ударные волны в солнечном ветре делятся на прямые (движущиеся и направленные от Солнца) и обратные (направленные к Солнцу, но двигающиеся вместе с потоком от него).

В последние годы стало ясно, что самые разнообразные разрывы, входящие в комбинации типа "двойные ударные волны", магнитные облака или магнитные бутылки, плазмоиды и "пузыри", а также разрывы, характерные для глобального возмущения короны Солнца — коронального вы-



броса массы – практически постоянно присутствуют как в ближнем космосе (солнечный ветер, магнитосферная плазма), так и в дальнем (звездный ветер). При этом, в силу динамического характера упомянутых областей они вступают в разнообразные нелинейные взаимодействия, характеризующиеся различными углами схлопывания и различным направлением магнитного поля по отношению к плоскости сильного разрыва. Из магнитной гидродинамики следует, что при взаимодействии сильных МГД разрывов в присутствии наклонного магнитного поля, кроме быстрых ударных волн и волн разрежения, могут образоваться также и медленные ударные волны. В солнечном ветре и в корне Солнца у магнитного поля обычно имеется азимутальная компонента, наряду с малой составляющей, перпендикулярной плоскости эклиптики. В силу этого медленные ударные волны, существующие при наличии наклонного магнитного поля, действительно могут возникать в корональной плазме и в плазме солнечного ветра. Важным признаком, выделяющим эти разрывы, является резкое увеличение плотности заряженных частиц и резкое уменьшение значения величины магнитного поля при переходе через ударный фронт. Число же Маха-Альфвена ударной волны будет меньше единицы, и волна в пределе при устремлении скачка плотности частиц к нулю перейдет в медленную магнитозвуковую волну.

Наряду с ударными волнами, в корональной плазме и в потоке солнечного ветра существуют также стационарные по отношению к потоку тангенциальные разрывы – частный случай так называемых солнечных разрывов направления, на которых отсутствует нормальная к поверхности разрыва компонента магнитного поля и при переходе через которые сохраняется значение величины полного давления. В начале 70-х годов было выдвинуто предположение о том, что граница коронального стримера может быть представлена в виде МГД тангенциального разрыва. Затем был предложен механизм возникновения солнечных тангенциальных разрывов в нижней короне за счет случайного перемещения оснований силовых линий солнечного магнитного поля.

Представляет интерес рассмотреть взаимодействие солнечных быстрых ударных волн с границами корональных неоднородностей, описываемых в виде корональных тангенциальных разрывов. Также имеет смысл рассмотреть взаимодействие быстрых ударных волн, догоняющих друг друга в потоке солнечного ветра, и взаимодействие солнечной быстрой ударной волны с границей плазменной неоднородности в переходной области хромосферы, представляемой контактным разрывом. Частным случаем нелинейного взаимодействия МГД солнечных разрывов будет также

взаимодействие быстрых ударных волн солнечного ветра с системой *головная ударная волна – магнитосфера Земли*, представляющее значительный интерес при исследовании проблемы изучения так называемой космической погоды и рассмотрении динамики солнечно – земных связей. И безусловно при рассмотрении основной причины этих связей возникает проблема переноса энергии, количества движения, солнечного магнитного поля и массы от Солнца к Земле во время определенных солнечных возмущений типа солнечных вспышек и корональных выбросов массы, сопровождающихся возникновением и нелинейным взаимодействием МГД разрывов в корональной солнечной плазме и в плазме солнечного ветра. Неоднородности, связанные с солнечной активностью, не только непосредственно проецируются в плазму солнечного ветра, но и претерпевают значительные изменения, проходя через корональные дыры, стримеры, магнитные облака, гелиосферный токовый слой и стационарные головные ударные волны перед кометой или планетарной магнитосферой.

В последнее время уделяется также внимание изменениям, которые вносит в условия на фронте сильного разрыва квазимагнитогидродинамический характер плазмы солнечного ветра при наличии анизотропии газокINETического давления (или термальной анизотропии) по отношению к направлению магнитного поля. В частности, представляет интерес учет влияния анизотропии давления на изменение величины плотности плазмы и интенсивности межпланетного магнитного поля при переходе через поверхность сильного разрыва.

Кроме того, важной проблемой является изучение нелинейного взаимодействия солнечных ударных волн с магнитосферой типа магнитосферы Земли, которая во многом имеет сходство с другими магнитосферами типа магнитосферы Юпитера, кометосферы и звездных магнитосфер. Также известно, что недавно было предложено считать определенные плазменные области, расположенные над активными областями Солнца, особым видом магнитосфер.

В работе рассматривается как лобовое МГД взаимодействие ударных волн солнечного ветра с системой *головная ударная волна – магнитосфера Земли*, так и наклонное взаимодействие с фронтом головной волны, что может представить значительный интерес для решения многих задач астрофизики, солнечной физики, геофизики и прогнозирования космической погоды.

Цель работы состоит в рассмотрении МГД взаимодействия часто наблюдаемых солнечных быстрых ударных волн с корональными тангенци-

альными разрывами и выяснении причины неожиданного появления медленных ударных волн в солнечной плазме. Затем изучается взаимодействие вращательных разрывов с границей хромосферной неоднородности, представляемой контактными разрывом, и догонное взаимодействие солнечных быстрых ударных волн друг с другом в потоке солнечного ветра. Далее описывается лобовое и наклонное взаимодействие быстрых ударных волн солнечного ветра с системой *головная ударная волна – магнитосфера Земли* с выделением физического значения получаемых результатов. Таким образом, строится единая теория нелинейных взаимодействий МГД разрывов в короне вблизи от Солнца, в потоке солнечного ветра и вблизи от магнитосферы Земли.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые доказана возможность возникновения медленных невспыхивающих солнечных МГД ударных волн в плазме корональных полостей в основании лучевых структур и корональных дыр за счет преломления солнечных быстрых ударных волн.

2. Установлена вероятность появления ударных волн в переходной области хромосферы в результате взаимодействия Альфвеновского или вращательного разрыва *A* с контактными разрывом *C* и указано на возникновение диссипации энергии магнитного поля.

3. Указано на влияние термальной анизотропии солнечного ветра на изменение величины магнитного поля при переходе через фронт бегущей ударной волны.

4. Рассмотрено лобовое взаимодействие быстрых ударных волн солнечного ветра с системой *головная ударная волна – магнитосфера Земли* и доказано появление вторичных волн разрежения в магнитопереходном слое.

5. Впервые указано на возможность возникновения вторичной обратной ударной волны в магнитопереходном слое.

6. Произведена физическая оценка влияния межпланетного наклонного магнитного поля на нелинейное взаимодействие солнечной МГД ударной волны с фронтом головной ударной волны и указано на асимметрию этого взаимодействия, что согласуется с кинетической моделью.

Научная и практическая ценность диссертации.

Диссертация во многом является результатом работы автора с 1980 по 1996 годы в рамках двух международных проектов: STIP (Изучение движущихся межпланетных явлений) и SOLTIP (Солнечные и межпланетные

транзиентные явления), направленной на выяснение физической основы ударного нелинейного воздействия солнечных магнитогидродинамических процессов на солнечный ветер и магнитосферу Земли.

В диссертации показано, что медленные ударные волны, наблюдаемые вблизи Солнца, могут возникнуть в результате преломления солнечных быстрых ударных волн в корональные неоднородности типа корональных дыр и корональных полостей. Таким образом, продемонстрирован особый вид переноса солнечной энергии, сопровождаемый уменьшением величины энергии магнитного поля.

Рассмотрено также взаимодействие ударных волн солнечного ветра с магнитосферой Земли и впервые доказано возникновение вторичных волн разрежения, в действительности наблюдаемых на нескольких космических аппаратах.

Достоверность полученных результатов подтверждается данными экспериментальных наблюдений, проведенных *in situ* на космических аппаратах ISEE1, ISEE3, и по наземным измерениям.

Предложенный в работе численный метод анализа взаимодействий МГД солнечных разрывов может быть применен для предсказания глобальных возмущений корональной солнечной плазмы и солнечного ветра, что является существенным моментом прогнозирования состояния плазмы в околоземном космическом пространстве, в настоящее время называемого «космической погодой».

Предложенная теория исследования взаимодействий МГД солнечных разрывов позволяет также лучше представить физический механизм перехода энергии локальных солнечных магнитных полей в другие виды энергии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Решение задачи о взаимодействии солнечных быстрых ударных волн с корональными тангенциальными разрывами, представляющими плазменные границы корональных стримеров и границы корональных дыр.
2. Доказательство возможности возникновения преломленной медленной ударной волны в корональной полости и в корональной дыре.
3. Модель взаимодействия солнечного вращательного разрыва с переходной областью хромосферы, при котором возникают ударные волны, объясняющие механизм возникновения диссипации энергии магнитного поля и взрывоподобных процессов.

4. Вывод обобщенного закона затухания Крюссара-Ландау, с достаточной точностью описывающего (по данным модели ISPM) затухание быстрых ударных волн в солнечном ветре.

5. Оценка влияния термальной анизотропии протонов солнечного ветра на скачок величины межпланетного магнитного поля при переходе через фронт бегущей быстрой ударной волны.

6. Модель лобового столкновения МГД быстрой ударной волны солнечного ветра с системой *головная ударная волна – магнитосфера Земли* с учетом поперечного магнитного поля и доказательство возникновения вторичной быстрой волны разрежения, вызывающей снижение величины давления на магнитопаузу вслед за ударным скачком.

7. Изучение наклонного взаимодействия быстрой ударной волны солнечного ветра с фронтом головной ударной волны перед магнитосферой Земли и демонстрация асимметричности рассматриваемого процесса по отношению к линии *Земля – Солнце*, что соответствует экспериментальным плазменным данным.

8. Доказательство возможности возникновения обратной быстрой ударной волны в магнитопереходном слое перед магнитосферой Земли.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались:

- на симпозиуме КАПГ по солнечно – земной физике (Тбилиси, 1976);
- на симпозиуме КАПГ по солнечно – земной физике (Ашхабад, 1979);
- на международной конференции “Год солнечного максимума” (Симферополь, 1981);
- на симпозиуме СТИП по солнечным и межпланетным интервалам (Мэйнус, Ирландия, 1982);
- на семинаре КАПГ по теории солнечных вспышек (Рига, Латвия, 1982);
- на международном семинаре “Исследование солнечного ветра геофизическими, радиоастрономическими и прямыми методами” (Москва, 1984);
- на международном симпозиуме “Полярные геомагнитные явления” (Суздаль, 1986);
- на V симпозиуме КАПГ по солнечно – земной физике (Самарканд, 1989);
- на Рижской школе по космической физике (Рига, Латвия, 1987);

- на I коллоквиуме КОСПАР “Физика внешней гелиосферы” (Варшава, Польша, 1989);
- на VI Научной ассамблее Международного геофизического союза (Экзетер, УК, 1989);
- на 3 коллоквиуме КОСПАР “Солнечный ветер 7” (Гослар, Германия, 1991);
- на I симпозиуме СОЛТИП (Либлице, Чехословакия, 1991);
- на XX Генеральной ассамблее Международного геофизического союза (Вена, Австрия, 1991);
- на 2 симпозиуме СОЛТИП (Накаминато, Япония, 1994);
- на 16 Международной конференции Национальной Солнечной Обсерватории (Сакраменто Пик, США, 1995);
- на 3 симпозиуме СОЛТИП (Бейджин, Китай, 1996);
- на конференции, посвященной памяти М.Н.Гневышева и А.И.Оля (Санкт-Петербург, 1997);
- на Международной конференции “Солнечный ветер 9” (Нантакет, США, 1998);
- на VII симпозиуме по солнечно-земной физике (Москва, 1998);
- на конференции “Новый цикл активности Солнца” (Пулково, 1998);
- на Международной конференции “Структура и динамика солнечной короны” (Троицк, 1999);
- на Международной встрече “Затмения и солнечная корона” (Париж, Франция, 2000);
- на Международной конференции 9 Европейского и 5 Евро-Азиатского астрономических обществ “JENAM – 2000” (Москва, 2000);
- на Международной конференции “Солнце в максимуме активности и солнечно – звездные аналогии” (Пулково, 2000);
- на семинарах ГАО РАН, ИЗМИР АН, ЛОИЗМИР АН, СПбГУ, МГУ и на совещаниях секции РАН “Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле”.

Кроме того, часть результатов обсуждалась в лекциях, прочитанных в Университете г.Флоренция (Италия, 1990г.) и на летней школе штата Вирджиния (США, Линчберг, 1999–2000гг.). Также основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинаре по солнечно-земной физике в обсерватории города Медон (Франция, 1994г.) и на астрофизическом семинаре Астрофизического института г. Париж (Франция, 2000г.).

Публикации и личный вклад автора.

По теме диссертации автор имеет 93 научных публикации, из них 49 научных статей (34 – без соавторов) и 44 тезиса докладов на международных конференциях. В работах по исследованию явлений в солнечной плазме и в плазме солнечного ветра [48–50,59,64–66,69,70,73,75,80,82], выполненных в соавторстве, диссертанту принадлежит постановка задачи, выбор возможной аппроксимации исходных уравнений и метода решения, анализ результатов, а соавторам – численный счет, составление программы и совместный анализ полученных результатов.

В совместных работах [5,19,20,25], посвященных исследованию лобового столкновения ударной волны солнечного ветра с системой *головная ударная волна – магнитосфера Земли*, диссертанту принадлежит постановка и решение задачи, а также сравнение полученного результата с экспериментальными данными. В работах [15,35,47], посвященных изучению влияния термальной анизотропии на движение межпланетных ударных волн, как постановка задачи, так и сам метод решения задачи были предложены и осуществлены диссертантом.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, 55 рисунков, 12 таблиц, списка литературы из 272 наименований и списка работ автора (93 наименования). Общий объем – 338 страниц.

Содержание работы.

Солнечные вспышки как источник энергии, возмущающий межпланетную среду и создающий при этом межпланетную бурю, а также порождающий ударные волны, бегущие по потоку солнечного ветра, уже давно стали описывать и чисто газодинамически, и магнитогазродинамически.

В настоящее время получен большой набор экспериментальных данных по наблюдению межпланетных сильных разрывов, вызываемых и солнечными вспышками, и так называемыми корональными выбросами массы (или СМЕ), которые, будучи геоэффективными, часто вызывают магнитосферную и геомагнитную бури.

Очень важным вопросом, связанным с переходом энергии из одного вида в другой, происходящим при солнечных вспышках и при возникновении корональных выбросов массы (называемых раньше транзиентами) в районе корональных стримеров, является рассмотрение взаимодействия различных магнитогазродинамических разрывов друг с другом, происхо-

дящего, как известно, в плазме солнечной атмосферы, в солнечном ветре и вблизи от магнитосферы Земли.

В связи с первой проблемой прежде всего требуется разработать методику решения проблемы взаимодействия корональных бегущих МГД ударных волн со стационарными тангенциальными разрывами, ограничивающими различные неоднородные области корональной плазмы. Разработке этой методики с использованием идей А.Г.Куликовского, Бэйзера и Эриксона, В.П.Коробейникова, А.А.Бармина, Е.А.Пушкаря и В.Н.Сазоновой, примененных в классической МГД, посвящена первая глава диссертации, включающая 6 параграфов.

В ГЛАВЕ I рассмотрены быстрые и медленные МГД ударные волны в трехмерном случае, когда магнитное поле по направлению параллельно вектору скорости плазмы перед волной. В первом параграфе приводятся динамические условия Рэнкина-Гюгонно для косых магнитогидродинамических ударных волн. Все законы сохранения на МГД ударной волне преобразованы к такому виду, когда все значения величин за ударной волной явно зависят от параметров набегающего потока, ударного скачка плотности и от угла между вектором скорости плазмы и плоскостью нормали к фронту ударной волны. Эти величины непосредственно входят в уравнение ударной адиабаты.

Во втором параграфе система дифференциальных уравнений, описывающая МГД стационарные непрерывные волны разрежения, сведена к квадратурам.

В третьем параграфе с использованием известных классических МГД условий эволюционности по известному в МГД методу строятся обобщенные поляры для МГД ударных волн и волн разрежения, которые представляют собой замкнутые кривые для быстрых ударных волн.

При малом значении плазменного параметра β , при достаточно сильном магнитном поле в плоско-поляризованном случае МГД поляры оканчиваются быстрой ударной волной, называемой включающей ударной волной, касательная составляющая магнитного поля перед которой отсутствует, а за фронтом волны она возникает. При этом даже в присутствии небольшого отклонения вектора индукции или напряженности магнитного поля от плоскости, нормальной к волне, включающие волны не возникают. Указывается на те условия, при которых медленные волны становятся эллипτικο-гиперболическими. Важно также, что в случае медленных волн, распространяющихся по гиперболической области, поляры состоят из двух замкнутых петель, при распространении же по эллипτικο-гиперболическому состоянию они могут иметь только конечную интен-

сивность, и их поляры будут аналогичны полярам быстрых волн. Определены пределы, в которых могут изменяться параметры потока плазмы за волной, и области начальных параметров, в которых свойства волн качественно различны. Исследованы зависимости поляра от чисел Маха и Альфвена.

В четвертом параграфе дается постановка трехмерной задачи о столкновении солнечной быстрой ударной волны S_+ с тангенциальным разрывом T в наиболее общем случае, когда скорости потоков и векторы индукции или напряженности магнитного поля имеют произвольное направление с двух сторон от тангенциального разрыва. Выяснено также, что в случае разнонаправленных скоростей потоков частиц плазмы решение задачи должно строиться существенно иным способом, чем в случае однонаправленных потоков частиц.

В пятом параграфе система МГД дифференциальных уравнений в частных производных приводится к характеристическому виду, и обнаруживаются пять инвариантов системы дифференциальных уравнений для пяти неизвестных.

В шестом параграфе с помощью этих интегральных инвариантов рассматривается задача о столкновении МГД ударной волны с тангенциальным разрывом в виде, удобном для полного решения задачи.

В ГЛАВЕ II исследуются возможные конфигурации потоков, возникающие при взаимодействии солнечной быстрой ударной волны со стационарным тангенциальным разрывом.

В первом параграфе аналитически демонстрируется невозможность присутствия в решении задачи преломленной волны разрежения при сонаправленных скоростях с разных сторон от тангенциального разрыва.

Во втором параграфе для случая разнонаправленных скоростей потоков плазмы или при сдвиге скорости плазмы в противоположное направление на тангенциальном разрыве показывается, что одна из двух волн (преломленная или отраженная) – всегда ударная, другая же волна – волна разрежения.

В пространстве начальных параметров построены границы существования решений, а также границы между решениями различных типов. Численно построены и исследованы решения задачи. Установлено, что изменение направления вектора скорости плазмы (с одной из сторон тангенциального разрыва) на противоположное при остальных фиксированных значениях параметров приводит к качественной перестройке решения. При отсутствии скачка величины скоростей потоков и наличии скачка модуля магнитного поля на тангенциальном разрыве возможно возник-

новение решения с отраженной ударной волной при падении на менее плотную плазму (типа корональной дыры) и, наоборот, с отраженной волной разрежения при падении на область с более плотной плазмой. Показано, что одно и то же решение существует для различных скачков плотности и скорости потока плазмы на тангенциальном разрыве, связанных определенным соотношением. Получено также, что решения с медленной преломленной ударной волной могут катастрофическим образом переходить в решение с вращательным разрывом.

В **третьем параграфе** рассматривается, как влияет изменение углов отклонения магнитного поля на области, в которых существует решение задачи о взаимодействии быстрой ударной волны с тангенциальным разрывом в достаточно общем случае.

В **четвертом параграфе** обсуждается проблема взаимодействия вращательного или альфвеновского разрыва, движущегося вдоль силовой трубки магнитного поля в переходной области хромосферы Солнца в направлении короны, с контактным разрывом, при переходе через который скачком меняется плотность плазмы. На основе использования результатов численных расчетов, сделанных в МГД, впервые показана возможность возникновения преломленной медленной ударной волны в переходной области хромосферы Солнца. Эта волна является диссипативной и меняет как кинетическую, так и тепловую энергии плазмы, влияя соответствующим образом, по-видимому, на спикюлы и способствуя возникновению взрывных или взрывоподобных событий.

В **пятом параграфе** обсуждается постановка задачи о взаимодействии солнечной или корональной быстрой ударной волны с тангенциальным разрывом, представляющим собой или границу корональной дыры, или границу стримера,

Обсуждается использование построения поляр отраженной ударной волны и волны разрежения с обнаружением ее пересечения с полярной преломленной волны. Точка пересечения соответствует равенству полных давлений и углов наклона скоростей сверху и снизу от тангенциального разрыва и, следовательно, для волн, соответствующих этой точке, граничные условия выполняются.

Шестой параграф посвящен рассмотрению и решению задач, связанных с конкретными случаями взаимодействия быстрых ударных волн с тангенциальными разрывами в короне Солнца. Показывается, что солнечная быстрая ударная волна преломляется в плотную верхнюю область коронального стримера, пройдя через граничную поверхность, представляемую в виде тангенциального разрыва, как медленная ударная волна —

только в том случае, если внутри стримера имеется поток плазмы, направленный от Солнца и имеющий скорость, много большую, чем скорость плазмы вне стримера, и сравнимую со скоростью распространения ударного возмущения. Если внутри стримера происходит сильное возрастание величины плотности плазмы и незначительное изменение скорости потока, то в рамках модели МГД тангенциального разрыва необходимость сохранения величины полного давления приводит при условии роста плотности плазмы к сильному уменьшению (практически до нуля) величины магнитного поля внутри стримера, что создает невозможность распространения внутри него медленных ударных волн, для существования которых необходимо присутствие достаточно сильного магнитного поля. При этом конкретные значения начальных параметров не влияют на этот вывод.

Изучение взаимодействия солнечной быстрой ударной волны S_+ с границей корональной полости, находящейся внутри стримера и представляемой в виде тангенциального разрыва T с уменьшением величины плотности плазмы при переходе через него, в случае наклонного взаимодействия (при угле столкновения в 30°) указывает на возникновение медленной ударной волны S_- : $S_+ T \rightarrow R_+ T S_-$, где S_+ , R_+ – быстрая удар-

ная волна и быстрая волна разрежения. Этот случай подобен случаю взаимодействия солнечной быстрой ударной волны с границей корональной дыры. Существенно то, что при прохождении преломленной медленной ударной волны через корональную полость через верхнюю часть стримера в тоже время может проходить преломленная быстрая ударная волна. Это указывает на асимметрию воздействия корональной ударной волны на область стримера. Важно отметить, что при корональном выбросе массы по данным космического аппарата SOHO часто наблюдается асимметричное возмущение корональной лучевой структуры или стримера со сферически несимметричным нелинейным возмущением типа МГД ударной волны. В настоящее время на основе рассмотрения конкретных экспериментальных данных в научной литературе действительно обсуждается возможное присутствие медленных ударных волн с вогнутым ударным фронтом в корональном выбросе массы.

В этой главе также численно доказываемся, что корональная медленная МГД ударная волна возникает также в более общем случае при преломлении солнечной быстрой ударной волны внутрь корональной дыры. Медленная ударная волна будет уменьшать величину магнитного поля внутри

корональной дыры и соответственно будет способствовать истечению плазмы, поддерживая движение ускоренного солнечного ветра..

ГЛАВА III посвящена теоретическому изучению эволюции ударных волн, возникающих как во вспышках на Солнце, так и в корональных выбросах массы. Эти солнечные и корональные ударные волны рассматриваются при их движении в солнечном ветре вдали от источника их возникновения, при этом они уже часто называются межпланетными ударными волнами.

В первом параграфе в рамках классической МГД обсуждается наклонное взаимодействие сильных разрывов типа вращательных и межпланетных ударных волн, при котором существенную роль играют возникающие контактные разрывы (неустойчивые в солнечном ветре из-за диффузии), для которых пишутся условия непрерывности потока с системой четырех граничных условий. Обсуждается алгоритм численного решения поставленной задачи.

Во втором параграфе рассматривается догонное взаимодействие быстрых ударных волн в потоке солнечного ветра и впервые доказывается возможность возникновения события типа R (по классификации А.Хундхаузена), характеризующимся возрастанием величины межпланетного магнитного поля в потоке солнечного ветра, происходящим скачкообразно на ударных волнах (быстрой прямой и медленной обратной) и постепенно на медленной прямой и быстрой обратной волнах разрежения.

В третьем параграфе исследуется возможность применения обобщенного решения Римана для описания потока плазмы за слабой (вдали от источника) быстрой ударной волной. Рассматриваются четыре случая для заданных значений начальных параметров: а) случай очень малой величины магнитного поля перед фронтом ударной волны; б) случай средних значений величины магнитного поля; в) случай умеренного значения этой величины, при котором противодавление сравнимо с величиной магнитного давления; г) случай большого значения величины поля с противодавлением, пренебрежимо малым по сравнению с магнитным давлением. Показано, что во всех четырех случаях второй инвариант Римана постоянен и, таким образом, с помощью проведенной оценки инвариантов Римана на фронте МГД быстрой ударной волны аналитически доказано, что движение потока плазмы в присутствии поперечного магнитного поля можно описывать при помощи обобщенного решения Римана.

В четвертом параграфе для тех же четырех случаев задания исходных параметров аналитически описана эволюция уже образовавшейся быстрой ударной волны или затухание МГД ударных волн при различных значени-

ях вклада поперечного магнитного поля и, соответственно, при различных значениях отношения скорости Альфвена V_A к скорости звука a . При этом получен обобщенный закон Крюссара-Ландау. Показано, что слабое магнитное поле мало влияет на вид закона затухания.

В пятом параграфе показана возможность применения обобщенного закона Крюссара-Ландау для описания движения быстрых ударных волн в потоке солнечного ветра при значениях $k = V_A / a > 1$, меньших 1 и много меньших 1.

Четвертый же случай ($k \gg 1$), когда величина магнитного поля велика, а противодавление пренебрежимо мало, соответствует движению быстрой ударной волны в короне Солнца и в магнитосферной среде. Полученный закон затухания быстрых ударных волн в рамках плоского приближения согласуется с известной полуэмпирической моделью IPSM.

В шестом параграфе рассматривается влияние экспериментально наблюдаемой термальной анизотропии, при которой давление поперек магнитного поля не равно давлению вдоль поля, на движение быстрых ударных волн в плазме солнечного ветра. На основе использования незамкнутой системы квазимагнитогидродинамических уравнений динамической совместности численно исследуется изменение параметров межпланетной плазмы на фронте быстрой ударной волны. Структура фронта считается заданной. Изучаются возможные варианты изменения параметров плазмы для слабого и сильного магнитных полей, отражающих обстановку в корональной плазме, плазме солнечного ветра и внутри магнитосферы.

Получено, что учет анизотропии давления может оказаться существенным при изучении изменения параметров межпланетной плазмы на фронте быстрой нестационарной ударной волны, так как в анизотропном случае наблюдается ряд новых закономерностей и, в частности, при $k \geq 6$ величина поля растет сильнее, чем величина плотности.

Кроме того, начальное сильное магнитное поле ($\beta \ll 1$) существенно влияет на изменение параметров плазмы на фронте ударной волны по сравнению со случаем слабого поля ($\beta > 1$), и в анизотропном случае изменение магнитного поля на фронте ударной волны меньше, чем в изотропном. С увеличением параметра анизотропии λ_1 перед ударной волной значение параметра λ_2 за ударной волной увеличивается.

Таким образом, произведена оценка влияния термальной анизотропии на быстрые ударные волны солнечного ветра и показано, что в анизотропном случае ударные волны могут оказывать более сильное влияние на межпланетное магнитное поле, чем на плотность плазмы, но само измене-

ние величины магнитного поля при переходе через фронт быстрой ударной волны оказывается меньшим того же изменения в изотропном случае. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными космических аппаратов “Прогноз”, “Прогноз-1”, а также данными измерений скачков величины межпланетного магнитного поля во время перехода через фронт магнитосферной головной ударной волны.

В ГЛАВЕ IV рассмотрено взаимодействие быстрых межпланетных ударных волн с системой *головная ударная волна – магнитосфера Земли*, как в случае лобового взаимодействия вблизи линии *Земля – Солнце*, так и в случае наклонного взаимодействия быстрых ударных волн с головной ударной волной перед магнитосферой Земли.

Вначале в **первых двух параграфах** дается постановка задачи и приводятся значения параметров стационарного обтекания потоком солнечного ветра магнитосферы Земли.

Затем в **третьем параграфе** исследуется взаимодействие нестационарной межпланетной ударной волны с фронтом головной ударной волны и с магнитопаузой в газодинамическом приближении без учета межпланетного магнитного поля. Головная ударная волна считается сильной и характеризуется числом Маха, равном 8, взаимодействие же межпланетной ударной волны с головным фронтом описывается как частный случай проблемы Римана – Кочина о распаде произвольного разрыва. Для нулевой линии тока, проходящей через лобовую точку обтекаемой магнитосферы, считается справедливым уравнение Бернулли.

При рассмотрении взаимодействия межпланетной ударной волны, преломленной в магнитопереходный или переходный слой (без учета магнитного поля), с границей магнитосферы сама граница (магнитопауза) считается подвижной или свободной границей, при переходе через которую величина плотности частиц резко уменьшается. Параметры отраженной от границы волны определяются с помощью метода пробного расчета численным решением системы уравнений, описывающей распад произвольного разрыва при столкновении межпланетной ударной волны с магнитопаузой. Показывается, что волна отражается от границы в виде обратной (по отношению к Солнцу) волны разрежения, преломленная же внутрь магнитосферы волна является ударной. Обратная волна разрежения для межпланетных ударных волн с числом Маха меньшим или равным 5 пройдет через переходный слой и отразится от тыла головной ударной волны в виде новой прямой вторичной волны разрежения. Здесь же оценивается промежуток времени, отделяющий внезапное начало ударного сжатия магнитосферы из-за межпланетной ударной волны от постепенно-

го начала понижения давления за счет пришедшей вторичной волны разрежения. Эта величина оказывается близкой к величине от 1 до 3 минут, что близко ко времени нарастания величины магнитного поля во время импульса внезапного начала геомагнитной бури.

В четвертом параграфе исследуется лобовое (вблизи линии Земля – Солнце) взаимодействие быстрой межпланетной ударной волны с системой головная ударная волна – магнитосфера Земли в МГД приближении с учетом влияния поперечной компоненты межпланетного магнитного поля. Столкновение межпланетной ударной волны с головным фронтом рассматривается также в рамках решения обобщенным методом численного пробного расчета задачи о распаде произвольного разрыва. Определяются параметры быстрой ударной волны, преломленной в магнитопереходный слой и показывается, что межпланетное магнитное поле незначительно уменьшает скорость преломленной в магнитопереходный слой волны, скорость же головной ударной волны несколько возрастает. Однако, и в случае слабого межпланетного магнитного поля головная ударная волна будет сноситься усилившимся потоком солнечного ветра, хотя и несколько медленнее, чем это происходит в отсутствии магнитного поля.

Далее рассматривается столкновение межпланетной быстрой ударной волны с магнитопаузой, представляемой в виде тангенциального разрыва, и показывается, что волна отразится от этой границы в виде быстрой волны разрежения, которую приближенно можно описывать обобщенной волной Римана. Таким образом, результат, полученный ранее при газодинамическом рассмотрении столкновения, подтверждается в рамках лобового МГД взаимодействия. Далее так же, как и в предыдущем параграфе, показывается возникновение вторичной быстрой волны разрежения, с приходом которой к магнитопаузе начинается постепенное уменьшение величины давления потока на магнитосферу. Расчет промежутка времени, отделяющий приход межпланетной ударной волны к магнитопаузе от прихода к ней вторичной волны разрежения при учете величины межпланетного магнитного поля, равной $3,5\gamma$ (или $3,5 \text{ nT}$), дает величину от 3 до 5 минут. Следовательно, за счет межпланетного магнитного поля время пробега возрастает по сравнению с чисто газодинамическим случаем.

В ГЛАВЕ IV впервые показано возникновение вторичных волн разрежения в магнитопереходном слое, возникающих как волны, отраженные от магнитопаузы. В пятом параграфе указывается на то, что полученный в данной главе результат был подтвержден экспериментальными наблюдениями, проведенными на аппаратах Эксплорер-33, Вела-3а и ISEE. Кроме того, было доказано преломление межпланетной ударной волны внутрь

магнитосферы в виде быстрой ударной волны, о чем когда-то высказывался В.П.Шабанский в связи с обсуждением возникновения диссипации энергии от волны, несущей сигнал SSC через магнитосферу Земли.

В шестом параграфе четвертой главы при рассмотрении наклонного взаимодействия межпланетной ударной волны с фронтом стоячей головной ударной волны в присутствии межпланетного поля, направленного или под углом в 45° (от Солнца), или в 135° (к Солнцу) к линии Земля – Солнце, доказываемая асимметрия взаимодействия, экспериментально обнаруженная при построении кинетической модели взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. При этом важно отметить близость полученного результата исследования наклонного взаимодействия вблизи линии Земля – Солнце к результату рассмотрения лобового столкновения.

В силу быстрого затухания медленных ударных волн в магнитопереходном слое из-за затухания Ландау представляется с физической точки зрения достаточным использовать рассмотрение лобового столкновения межпланетных ударных волн с учетом поперечной компоненты магнитного поля с системой *головная ударная волна – магнитосфера Земли*, при котором не возникают медленные ударные волны и вращательные разрывы.

Эти полученные в ГЛАВЕ IV результаты исследования можно применить для рассмотрения взаимодействия корональных ударных волн с магнитными облаками и изучения столкновения быстрых ударных волн с магнитосферой активной области Солнца.

В ГЛАВЕ V рассматривается отражение быстрой волны разрежения от магнитопаузы, представляемой в виде тангенциального разрыва, на основе приближенного решения уравнений магнитной гидродинамики, описывающих движение магнитосферной и солнечной плазмы в присутствии значительного магнитного поля. В первом параграфе обсуждаются методы решения дифференциальных уравнений. Во втором параграфе решение уравнений строится и для переменной начальной плотности, зависящей от координаты Лагранжа a , введением новой функции $h = h(a)$. В третьем параграфе рассматривается решение МГД уравнений для магнитопереходной области, в которой в первом приближении начальную плотность плазмы можно считать постоянной. Общее решение записывается в простом виде без производных от произвольных функций, что значительно упрощает решение основных краевых задач.

В предложенных рамках в четвертом параграфе исследуются решения краевых задач: задачи Коши, задачи Гурса и смешанной задачи.

В пятом параграфе ставится и решается важная для астрофизики и геофизики задача об изучении движения границы магнитосферы (магнитопаузы) под действием вторичной быстрой волны разрежения, пришедшей со стороны солнечного ветра.

В шестом параграфе впервые доказывается возможность образования обратной (направленной к Солнцу) быстрой ударной волны в магнитопереходном слое перед магнитосферой за счет опрокидывания быстрой неударной волны сжатия, идущей от магнитосферы к тылу фронта головной ударной волны.

В седьмом параграфе на основе использования обобщенного закона Крюссара-Ландау, полученного в данной работе, исследуется движение быстрой ударной волны, преломленной внутрь магнитосферы в ударном виде, и рассматривается ее столкновение с плазмопаузой, представляемой в виде стационарного контактного разрыва. При этом важно подчеркнуть аналогию между рассматриваемым взаимодействием и взаимодействием вращательного разрыва с переходной областью в хромосфере Солнца, рассмотренным во второй главе, за исключением противоположного направления приходящего сильного разрыва. Таким образом демонстрируется возможность применения единой МГД теории взаимодействия сильных разрывов к солнечной, корональной, межпланетной и магнитосферной плазме.

Список научных работ автора, отражающих содержание диссертации

1. Гриб С.А. Затухание плоских ударных волн в поперечном магнитном поле. // Вестник ЛГУ. 1968, 1, с. 77–90.
2. Гриб С.А. О затухании слабых ударных волн в космических условиях. // Сб. докладов 2-ой научной конференции молодых специалистов. М., ИЗМИРАН, 1968, с. 77–87.
3. Grib S.A. On the interaction of the shock waves with the magnetosphere of the Earth during the geomagnetic storm with sudden commencement. // Program and Abstracts for the XVI IUGG General Assembly. Moscow: Nauka, 1971, p. 452.
4. Гриб С.А. Взаимодействие ударных волн с магнитосферой Земли. // ДАН БССР. 1972, т. 16, с. 493–496.

5. Брюнелли Б.Е., Гриб С.А. О взаимодействии ударных волн солнечного ветра с магнитосферой Земли. // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. вып.23, 1972, М.: Наука, с.369–398.

6. Гриб С.А. Движение подсолнечной магнитосферы во время внезапного начала геомагнитной бури. // Научная сессия по проблемам магнитосферы и высокоширотного магнито-ионосферного комплекса, Норильск, 1973, с.47.

7. Grib S.A. On the motion of the subsolar point of the magnetosphere during the sudden storm commencement. // Program and Abstracts of the 2 General Assembly in Kyoto, Japan, 1973, IGGU, Paris, 1973, p.87.

8. Grib S.A. Some questions of the magnetospheric gasdynamics. // 2 Nat. Congress On Theor. and Applied Mechanics. Varna, 1973, p.21.

9. Гриб С.А. Некоторые вопросы взаимодействия ударных волн солнечного ветра с магнитосферой Земли. // Геомагнетизм и аэронаука, 1973, т.13, вып.5, с.788 – 793.

10. Гриб С.А. О движении ударной волны в магнитосферной среде. // Сб. Геомагнитные исследования, №14, М., Наука, 1975, с.47–54.

11. Гриб С.А. Ударные волны солнечного ветра и магнитосфера Земли. // Сб. Суббури и возмущения в магнитосфере, Наука, Ленинград, 1975, с.97–103.

12. Гриб С.А. Ударная волна – одна из причин анизотропии давления. // VII Ленинградский Международный семинар: Корпускулярные потоки Солнца и радиационные пояса Земли и Юпитера”, Ленинград, АН, 1975, с.216.

13. Гриб С.А. Отражение волны разрежения от магнитосферы Земли. // ДАН СССР, 1975, т.223, 5, с.1106–1109.

14. Гриб С.А. Вторичное взаимодействие ударных волн и их роль в развитии геомагнитной бури с внезапным началом. // Космические лучи, 1975, М.: Наука, в.15, с.103–112.

15. Гриб С.А., Солунин А.Н. Изменение параметров солнечного ветра на фронте анизотропной ударной волны. // Сб. Солнечный ветер и магнитосфера, ИЗМИРАН, М, 1976, с.19–27.

16. Гриб С.А. Влияние волны разрежения на сжатие магнитосферы. // Сб. Геомагнитные исследования, в. 18, 1976, М.: Наука, с.54–59.

17. Гриб С.А. О влиянии анизотропных ударных волн на параметры межпланетной среды. // VIII Ленинградский международный семинар. Активные процессы на Солнце и проблема солнечного нейтрино, АН СССР, Ленинград, 1976, с.170–175.

18. Grib S.A. The Estimation of SI and SSC Values. // Geomagnetic Meridian. Leningrad, 1976, p.42.

19. Grib C.A., Martinov M.V. The breaking of the compression wave reflected from the magnetosphere during the magnetospheric storm. // Geomagnetic Meridian, Leningrad, 1976, p.33.

20. Гриб С.А., Мартынов М.В. Образование ударной волны в магнито-переходном слое перед магнитосферой Земли. // Геомагнетизм и астрономия, 1977, т. 17, №2, с.252–258.

21. Гриб С.А. Нестационарное взаимодействие разрывов солнечного ветра с системой головная волна – магнитосфера Земли. // Симпозиум по физике магнитосферы, Иркутск, 12, 1977, с.32.

22. Гриб С.А. Оценка величины внезапного импульса геомагнитного поля для заданного изменения параметров солнечного ветра. // Геомагнитная активность и ее прогноз, М.: Наука, 1978, с.94–99.

23. Гриб С.А. Солнечный ветер и его взаимодействие с магнитосферой Земли. // Геомагнитная активность и ее прогноз, М.: Наука, 1978, с.123–154.

24. Гриб С.А. Влияние анизотропных ударных волн на параметры межпланетной плазмы. // Сб. Физические процессы в ионосфере и магнитосфере М.: ИЗМИРАН, 1979, с.23–28.

25. Grib C.A., Brunelli B.E., Dryer M., Shen W-W. Interaction of interplanetary shock waves with the bow shock-magnetopause system. // J.Geophys. Res., 1979, 84, A10, pp.5907–5920.

26. Гриб С.А. О квазимагнитогидродинамическом подходе к описанию поведения космической плазмы и разрывных структур солнечного ветра. // Симпозиум КАПГ по солнечно-земной физике, М.: Наука, 1979, с.29.

27. Grib S.A. The effect of anisotropic shock waves on the parameters of the interplanetary plasma. // Cambridge Mass, IAV Sympos., N91. Solar and Interplanetary Dynamics, 1979, p.37.

28. Гриб С.А. Нелинейное взаимодействие ударных волн солнечного ветра с магнитосферой Земли в присутствии наклонного магнитного поля. // Сб. Геомагнитные исследования, в.27, М.: Наука, 1980, с.88–93.

29. Grib S.A. Short-term predictions of a sudden geomagnetic impulse value on the basis of the interplanetary data. // *Solar-Terrestrial Predictions Proceedings*, v.4, Boulder, Co., 1980, pp.A-53 – A-60.

30. Гриб С.А. Влияние наклонного межпланетного магнитного поля на ударные взаимодействия во время геомагнитной бури. // *Сб. Геомагнитное поле и внутреннее строение Земли*, М.: ИЗМИРАН, 1980, с.285–291.

31. Grib S.A. Nonlinear interaction of solar wind shock waves with the magnetosphere of the earth in oblique magnetic field. // *Study of Travelling Interplanetary Phenomena*, Smolenice, 1980, p.15.

32. Grib S.A. On the interaction and evolution of strong discontinuities in the solar wind plasma. // *Solar Maximum Year Processes. Intern.Workshop.*, Simferopol, v.2, 1981, pp.34–39.

33. Grib S.A. Interaction of non-perpendicular / parallel solar wind shock waves with the Earth's magnetosphere. // *Space Sci.Rev.*, 1982, 32, pp.43– 48.

34. Grib S.A. Some aspects of the interactions and evolution of the solar wind strong discontinuities. // *Abstracts of STIP Workshop*, Maynooth, 1982, p.15.

35. Гриб С.А., Солунин А.Н. Вывод квазигидродинамических уравнений, описывающих поведение космической плазмы. // *Анализ структуры геомагнитного поля*. М.: ИЗМИРАН, 1982, с.156–168.

36. Grib S.A., Dmitriev V.A., Nozdratchev V.D. To the problem of the interaction inside the sun-biosphere system. // *Soviet Conference on Bioelectronics*, 1982, p.35.

37. Гриб С.А. МГД модель плазменного потока в окрестности магнитосферного каспа. *Физика ионосферы и магнитосферы*. М.: ИЗМИРАН, 1983, с.111–114.

38. Grib S.A. Some aspects of the interactions and evolution of the solar wind strong discontinuities during STIP Intervals VI – XII. // *STIP symposium on solar/interplanetary intervals*, St.Patrick's College, Maynooth, 1984, pp.395–401.

39. Гриб С.А. Особенности поведения плазмы в районе магнитосферного выступа. // *Сб. Проблемы земного магнетизма*. М.: ИЗМИРАН, 1985, с.143–146.

40. Гриб С.А., Елисеев А.Ю., Коломийцев О.П. Поведение ионосферы в районе главного ионосферного провала во время магнитных возмущений. // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1985, т.25, с.211–218.

41. Grib S.A. Peculiarities of quasi-shock processes in the solar wind during the SMY and STIP intervals VI – XIV. // *Solar Maximum Analysis*, VNU Sc.Press, 1986, pp.345–351.

42. Гриб С.А., Елисеев А.Ю., Коломийцев О.П., Афонин В.В., Гдалевич Г.Л., Озеров В.Д., Соболева Т.Н. Влияние магнитосферных электрических полей на субавроральную ионосферу. // *Полярные геомагнитные явления*. М., 1986, с.45–46.

43. Гриб С.А. Магнитогидродинамические разрывы солнечного ветра и их взаимодействие с магнитосферой Земли. // *Солнечно-земная физика*. V Симпозиум КАПГ, М.: АН СССР, 1989, pp.69–70.

44. Grib S.A., Pushkar' E.A. MHD discontinuities interactions in the vicinity of the magnetosphere of the Earth. // *IGA 6 Scient.Assembly*, Exeter (UK), *IGA Bull.* N 53. Ed.M.Gadstem. 1989, pp.403.

45. Гриб С.А., Пушкар' Е.А. Наклонные взаимодействия межпланетных разрывов. *Солнечно-земная физика*. // V Симпозиум КАПГ, М., 1989, p.79.

46. Grib S.A., Pushkar' E.A., Chertkov A.D. Magnetic field reconnection in space plasma: new approach. // *IGA 6 Scient.Assembly*, Exeter (UK), *IGA Bull.* N 53, Ed.Gadstem. 1989, pp.415.

47. Гриб С.А., Храпов Б.А. Изменение параметров анизотропной межпланетной плазмы на фронте МГД ударной волны. // *Космические исследования*. 1989, т.27, № 2, с.258–266.

48. Grib S.A., Pushkar' E.A., Barmin A.A. The interactions of the solar wind discontinuities in the vicinity of the heliopause. // *1 COSPAR Colloq. Physics of the Outer Heliosphere*, Warsaw (Poland). Ed. S. Grzendzielski and D.E.Page. Oxford (UK): Pergamon Press, 1990, v.1, pp.317–320.

49. Pushkar' E.A., Barmin A.A., Grib S.A. The generation and disappearance of the solar wind shock waves in the result of the nonlinear interactions: the catastrophic reconstruction. // *XX General Assembly IUGG*, Vienna, 1991, *IGA Program and Abstracts.*, pp.565.

50. Grib S.A., Pushkar' E.A., Sazonova V.N. Coronal shock waves generation at the transition through the directional Discontinuity. // *Солнечные данные*, 1991, бюллетень N11, с.92.

51. Пушкар' Е.А., Бармин А.А., Гриб С.А. Исследование в МГД-приближении падения ударной волны солнечного ветра на околоземную го-

ловную ударную волну. // Геомагнетизм и астрономия. 1991, т.31, N3. с.522–525.

52. Grib S.A., Pushkar' E.A. Peculiarities of the MHD discontinuities interactions in the solar wind. // COSPAR Colloq. Ser. v.3, Solar Wind 7, Ed. by E.Marsch and R.Schwenn. Oxford: Pergamon Press, 1992, pp.457–459.

53. Grib S.A., Pushkar' E.A. Nonlinear solar wind discontinuities interactions in the vicinity of the terrestrial magnetosphere. // Proc.of the First SOLTIP Symp. Liblice, Chechoslovakia, 1992, v.2, pp.56–61.

54. Пушкаръ Е.А., Бармин А.А., Гриб С.А. Численное моделирование наклонного взаимодействия сильных разрывов солнечного ветра с околоземной головной ударной волной // Математическое моделирование. 1992, т.4, N 12, с.73–76.

55. Pushkar' E.A., Barmin A.A., Grib S.A. On the MHD approximation of the shock perturbation incidence on the terrestrial bow shock. // The Third Russia-Japan Joint Symposium on Computational Fluid Dynamics, Book of Abstracts II, Vladivostok, 1992, pp.156–157.

56. Grib S.A., Pushkar' E.A. The solar wind shock waves transport of energy across the heliopause in comparison with the terrestrial magnetopause and the plasmopause. // Annales Geophysicae, Suppl.III to v.10, 1992, C315, p.3.

57. Grib S.A. L'Astrophysique de l'Espace cosmique et le lieu de l'homme cree dans l'Univers. Actes du Seminaire BENA 5. // La Question du Sens, 1992, pp.72–75.

58. Grib S.A. The Dissipative MHD Discontinuities and their role in the coronal and/or solar wind flows. // 7 IAGA Scient.Assembly, Bull., Buenos Aires, 1993, C380.

59. Grib S.A., Sazonova V.N. The appearance of slow shock wave in the result of MHD coronal discontinuity interaction. // Ann. Geophysicae Suppl. 3 to v.11, 1993, C379.

60. Pushkar' E.A., Grib S.A. Oblique interaction of the solar wind strong discontinuities in the vicinity of the terrestrial magnetosphere. // Proc. of 19 Intern.Symp. on Shock Waves, Marseille, 1993, p.272.

61. Grib S.A. The role of MHD discontinuities in dynamics of solar corona. // Symp. on New Look at the Sun with Emphasis on Advanced Observations of Coronal Dynamics and Flares, Kofu, Japan, 1993, p.35.

62. Grib S.A. The complex structure of outer space and its relation to life on Earth. // *Studies in Science and Theology*, v.2, Labor et Fides, 1994, pp.138–142.

63. Grib S.A. The specific role of MHD discontinuities in dynamics of solar corona and solar wind. // *The Second SOLTIP Symposium, Nakaminato, Japan 13–17 June 1994 Abstracts*, p.32.

64. Koutchmy S., Bouchard O., Grib S.A. et al. About small plasmoids propagating in the solar corona. // *Proc. of the Third SOHO Workshop Solar Dynamic Phenomena and Solar Wind Consequences*, held at Estes Park, Colorado, USA, 1994, pp.139–142.

65. Grib S.A., Sazonova V.N. Nonlinear transformation of the solar fast shock wave inside the coronal streamer. // *Ann.Geophysicae Suppl.III to v.12*, 1994, p.3.

66. Гриб С.А., Сазонова В.Н. Об одном возможном механизме возникновения медленных ударных волн в короне Солнца.// *Письма в Астрон.журн.*1995, т. 21, N 4, с.294–299.

67. Grib S.A. The specific role of MHD discontinuities in dynamics of solar wind // *Proc. of the Second SOLTIP Symp., Nakaminato, Japan, 13–17 June 1994. STEP GBRSC News*, Ed. by Takashi Watanabe, v.5, 1995, pp.163–167.

68. Grib S.A. Nonlinear MHD discontinuities interactions in the solar corona and the solar wind as the drivers of the global heliospheric disturbances. // *Sixteenth International Workshop Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*, NSO, Sunspot, New Mexico, USA, 1995, p.24.

69. Grib S.A., Sazonova V.N. Interaction between the solar wind tangential discontinuity and the terrestrial magnetosphere. // *Annales Geophysicae, Suppl.III to v.13, part 3*, 1995, C.655.

70. Grib S.A., Koutchmy S., Sazonova V.N. Nonlinear MHD interactions in some coronal structures. // *Intern. Solar Wind 8 Conference*, Dana Point, California, 1995, p.60.

71. Grib S.A. The variety of MHD shock wave interactions in the solar wind flow. // *Intern. Solar Wind 8 Conference*, Dana Point, California, 1995, p.101.

72. Grib S.A. Coronal fast and slow shock waves and their role in the solar plasma dynamics // *Workshop on Solar Flares and Related Disturbances and Solar-Terrestrial Predictions Workshop Hitachi, Japan, Abstracts*, 1996, p.15.

73. Grib S.A., Pushkar' E.A., Sazonova V.N. The solar wind MHD discontinuity interactions with the terrestrial magnetosphere. // *Workshop on Solar*

Flares and Related Disturbances and Solar-Terrestrial Predictions Workshop Hitachi, Abstracts, 1996, p.52.

74. Grib S.A. Nonlinear MHD discontinuity interactions in the solar corona and the solar wind as the drivers of the global heliospheric disturbances. // Proc. of the Sixteenth International Workshop Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances, NSO/Sac Peak, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v.95, 1996, pp.399–407.

75. Grib S.A., Koutchmy S., Sazonova V.N. MHD shock interactions in coronal structures. // Solar Physics, 1996, v.169, pp.151–166.

76. Grib S.A. Solar energy dissipation due to the nonlinear MHD interaction. // CESRA Meeting Abstracts, 1996, p.23.

77. Grib S.A. MHD slow shock waves – close and far from the Sun. // Third SOLTIP Symposium on Solar and Interplanetary Transient Phenomena. Beijing, 1996, p.44.

78. Grib S.A. The rotational discontinuity interaction with the transitional region and its effect on the flux tubes. // 8th European Meeting on Solar Physics, Thessaloniki, Greece, 1996, p.15.

79. Гриб С.А. Краевые задачи магнитогидродинамики в приложении к солнечно-земной физике. // Известия ГАО. 1996, №211, с.80–94.

80. Grib S.A., Sazonova V.N. Nonlinear interactions of MHD shock waves with solar wind and coronal tangential discontinuities. // 4th Russian Symposium “Mathematical Models of the Sun-Earth Environment”, Moscow: Moscow University Publishers.1996, p.43.

81. Гриб С.А. МГД разрывы направления как индикатор солнечной активности. Современные проблемы солнечной цикличности. // Конференция, посвященная памяти М.Н. Гневышева и А.И.Оля. Труды. 26–30 мая 1997. ГАО. Санкт-Петербург, с.53–56.

82. Гриб С.А., Сазонова В.Н. Солнечные МГД разрывы и интегральные инварианты. // Известия ГАО в Пулковке. 1998, N212, Астрофизика, с.48–53.

83. Grib S.A. The Effect of the solar wind rotational discontinuity on the bow shock-magnetopause system. // 2nd Intern. conference “Problems of Geocosmos, St-Petersburg, July 1998, p.49.

84. Гриб С.А. Распад произвольного разрыва как источник диссипации энергии в короне Солнца и в солнечном ветре. // Труды конф. “Новый

цикл активности Солнца”, Пулково. 24–29 июня 1998, Санкт-Петербург, с.57–60.

85. Гриб С.А. О значении некоторых разрывных МГД структур для динамики солнечной плазмы и солнечного ветра. // УП Симпозиум по солнечно-земной физике России и стран СНГ. Тезисы докладов. М.: ИЗМИРАН. 1998, с.56.

86. Grib S.A. MHD slow shock waves – close and far from the Sun. // Proceedings of the Third SOLTIP Symposium, Oct.14–18, 1996, Beijing, China Ed. by Feng X.S., Wei F.S. and Dryer M., Intern. Academic Publishers, 1998, pp.301–304.

87. Grib S.A. The appearance of slow shock MHD waves in the solar plasma not far from the Sun. // Solar Wind 9 Abstract Book Nuntucket, Massachusetts, USA 5–9 October 1998, p.83.

88. Гриб С.А. Солнечные МГД разрывы и динамика корональных плазмодов. // Труды международной конференции “ Структура и динамика солнечной короны”, Троицк, 1999, с.50–55.

89. Grib S.A. On the coronal shock waves, driving the plasma inhomogeneities, their dissipation and the heating of the solar corona. // 9 European Meeting on Solar Physics. Magnetic Fields and Solar Processes. Conference Program and Abstract Book. Firenze, Italy, September 12–18, 1999, pp.66–67.

90. Grib S.A. The rotational discontinuity interaction with the transition region and its effect on the solar flux tubes. // JENAM 2000. 9 European and 5 Euro-Asian Astronomical Society Conference. Abstracts. Moscow, Russia, May 29 – June 3, 2000, p.121.

91. Гриб С.А. Внезапное возмущение системы *головная ударная волна – магнитосфера Земли* сильными разрывами солнечного ветра. // Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналогии. Международная конференция. РАН, ГАО, Санкт-Петербург, 2000г., с.236.

92. Гриб С.А. О нелинейном МГД взаимодействии плазменных и магнитных структур в короне Солнца. // Международная конференция. РАН, ГАО, Санкт-Петербург, 2000г., с.237.

93. Гриб С.А. Взаимодействия солнечных МГД разрывов в корональной плазме. // Известия ГАО № 215. Астрофизика и физика Солнца. СПб, 2000, с.123–129.



ЛР № 040815 от 22.05.97.

Подписано к печати 16.10.2001 г. Формат бумаги 60X90 1/16. Бумага офсетная.

Печать ризографическая. Объем 1,8 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 2050.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии НИИХ СПбГУ
с оригинал-макета заказчика.

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр. 26.

8-